

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БИОИНВАЗИИ УСОНОГИХ РАКОВ НА ШЕЛЬФЕ ЯПОНИИ

© 2010 Четырбоцкий А.Н.¹, Звягинцев А.Ю.², Кафанов А.И.²

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
690022 Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159
chetyrbotsky@yandex.ru

² Институт биологии моря ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Пальчевского, 17
ayzvyagin@gmail.com

Поступила в редакцию 16.02.2010

Приводятся результаты статистического анализа выборочных пространственно-временных распределений усонюгих раков *Amphibalanus improvisus*, *A. amphitrite*, *A. eburneus* в 1935–2000 гг. на шельфе Японии. Показано, что места их первичного нахождения приурочены к акваториям крупных морских портов и местам расположения энергетических комплексов. На основании результатов статистического анализа выборок выявлены эмпирические закономерности биоинвазии усонюгих раков в акватории Японского моря. Разработана и исследована математическая модель их биоинвазии, в которой учитываются эти закономерности и предлагаемые параметрические представления естественного прироста, внутри и межвидовой конкуренции, состояния морской среды, интенсивности судоходства и результатов жизнедеятельности населения, естественного расселения особей. Предлагаются алгоритмы динамики численности и оценки адекватности модели. Установлено хорошее согласование между модельными и выборочными распределениями.

Ключевые слова: инвазия, модель, параметрическая идентификация, усонюгие раки.

Количественный учет вселения видов и оценка возникающих при этом последствий относятся к важнейшим современным экологическим задачам. В течение последних 50–60 лет произошло (и происходит в настоящий момент) неконтролируемое массовое расселение видов в различные районы Мирового океана, которое обусловлено бурным ростом морских сообщений. Происходит вселение не только отдельных животных – иногда это глобальные перемены на уровне целых фаун. Чаще всего судами переносятся прикрепленные формы – представители усонюгих раков подотряда *Balanomorpha*, число отмеченных на судах видов которого составляет 9% от их общего количества [Зевина, 1982]. Они являются в большинстве случаев основными обрастателями как в бореальной, так и в тропической зоне, и их расселение с помощью судов происходит постоянно. К значительным изменениям экосистем может привести вселение не

только видов, но и их экоморф [Протасов, 2003]. Поэтому необходима оценка их близости к аборигенным видам. Так, в заливе Петра Великого (ЗПВ) вселение экоморф одного типа всего двух представителей усонюгих раков привело к радикальным изменениям в сообществах обрастания и бентоса залива. Практически все виды усонюгих раков, встречающиеся в сообществах обрастания в водах Японии, заносятся судами дальнего плавания в ЗПВ, но выживают лишь наиболее эврибионтные виды. В ЗПВ нами зарегистрировано вселение только двух известных в фауне Японии видов усонюгих раков – *Amphibalanus improvisus* и *A. amphitrite*, причем первый вид смог натурализоваться в российских водах Японского моря, а второй образует в летнее время зависимые популяции, гибнущие в своем большинстве при зимнем понижении температуры воды. Отметим, что оба вида сравнительно

устойчивы к ядам противообрастающих покрытий и могут создавать серьезные помехи судоходству [Полтаруха и др., 2006; Звягинцев, 2007].

Высокий темп развития стран Азиатско-Тихоокеанского региона во многом предопределил рост морских перевозок, что привело к значительному расширению ареалов в водах Японского моря многих организмов. В результате переноса с обрастанием судов новых для вод моря видов и неконтролируемого сброса балластных вод в ЗПВ количество вселенцев достигло 48 видов [Радашевский, Ивин, Звягинцев, 2008].

Актуальность изучения биологических инвазий определяется важностью и практической значимостью решения ряда проблем, например, проведения гидрометеорологического и экологического мониторинга акваторий. В самом деле, вследствие приспособленности особей некоторого вида к определенной физико-химической обстановке среды, структура их видового сообщества может служить интегральным показателем локального состояния морской среды. Так индикатором подъема вод может выступать размер обрастателя *Lepas anatifera* (Crustacea, Lepadidae) [Турпаева, Ямпольский, 1979]. Актуальной также является разработка комплекса мероприятий по эффективной защите от обрастания гидротехнических сооружений (ГТС), судов прибрежного плавания (СПП) и судов дальнего плавания (СДП).

Эффективное решение подобных проблем состоит в проведении ряда междисциплинарных исследований, где вместе с традиционными способами изучаются распределения параметров состояния среды, степень влияния на расселение организмов антропогенных факторов и т. д. Естественным результатов именно таких исследований является соответствующая математическая модель рассматриваемого процесса. В настоящей работе построение модели биоинвазии выполнено на основании выборочных пространственно-временных распределений особей трех видов усоногих раков (*A. amphitrite*, *A. improvisus*, *A. eburneus*) в прибрежье Японии, которое омывается

водами Японского моря и Тихого океана. Выбор в качестве объектов изучения именно усоногих раков обусловлен их принадлежностью к группе основных обрастателей [Зевина, Горин, 1975; Звягинцев, 2005], а также доступностью уникального фактического материала. Большинство вселившихся в ЗПВ видов ранее были отмечены как вселенцы прибрежных вод Японии [Otani, 2002], что служит основанием для создания соответствующей модели и построения ряда прогнозов.

Используемые материалы и их анализ

Основой нашей работы послужили публикации многих авторов (в первую очередь, М. Отани [Otani, 2002]), архив температуры и солености прибрежных вод Японского моря в 1927–2001 гг. ([Рудых, 2008] и дополнения автора, любезно нам представленные).

Ниже мы рассматриваем три вида *Balanidae*.

1. *A. amphitrite* – распространенный в субтропических и тропических водах вид. Широко встречается в обрастаниях СПП и ГТС у побережья Японии, Китая и Вьетнама [Davidoff, 1952]. Второстепенный вид на корпусах судов и ГТС ЗПВ, куда был занесен СДП. В бентосе залива до настоящего времени не обнаружен, однако зарегистрированы случаи зимовки отдельных особей на экспериментальных пластинах [Звягинцев, 2005]. *A. amphitrite* переживает отрицательные температуры [Calcagno, López Garra, Tablado, 1997].

2. *A. eburneus* – тропическо-субтропический сублиторальный вид, чувствительный к низким температурам. Впервые был обнаружен в обрастании мелких прогреваемых бухт ЗПВ. Его появление возможно в теплые годы, но он не сможет прижиться в ЗПВ [Зевина, Горин, 1975; Звягинцев, 2005].

3. *A. improvisus* – распространенный субтропическо-тропический вид, за последние десятилетия расселившийся с помощью судов по всему миру [Davidoff, 1952]. Встречается в качестве

второстепенного вида в обрастании корпусов СДП и СПП у побережья стран Юго-Восточной Азии. Отмечается широкий диапазон изменения температуры и солености в местах его обитания [Зевина, Стрелков, 1983]. Он является доминирующим видом сообществ обрастания СДП на транспортных линиях Владивосток – порты восточного побережья Японии. Как правило, встречается в обрастании СПП и ГТС в ЗПВ. В настоящее время натурализовался в бентосе этого залива, где успешно переносит отрицательные температуры воды.

На рис.1 приводятся, первичные находения в 1935–2000 гг. указанных видов в прибрежье Японии.

Статистический анализ простран-ственно-временных распределений в 1935–2000 гг. показывает близость участков прибрежья, где впервые были встречены рассматриваемые виды, к акваториям крупных городов (см. рис.1). В частности, они были встречены вблизи акваторий крупных морских портов: г. Токио (139.75° в. д., 35.69° с. ш.; 12.4 млн жителей, 1952), г. Хиросимы (132.47° в. д., 34.40° с. ш.; 2.8 млн жителей, 1967), г. Китакою (130.85° в. д., 33.90° с. ш.; 1.02 млн жителей, 1970). Это вполне объяснимо тем, что интенсивность судоходства определяется производственными мощностями портов. Поэтому, чем крупнее порт, тем большие объемы балластных вод с взрослыми особями и личинками видов-вселенцев попадают в окрестности его акватории. Их появление там происходит также в результате размножения обрастателей судов. При благоприятных условиях эти организмы размножаются и расселяются.

Первичные обнаружения усоногих раков отмечены также в окрестностях небольших городов: г. Цуруга (135.06° в. д., 35.65° с. ш.; 0.068 млн жителей; 1967), г. Майдзуру (135.18° в. д., 35.53° с. ш.; 0.094 млн жителей; 1967), г. Аомори (140.75° в. д., 40.82° с. ш.; 0.131 млн жителей; 1967). Это связано с путями интенсивного судоходства и местами, где для вселенцев имеются благоприятные для них условия обитания. Так, в г. Цуруга расположена атомная электростанция (АЭС). Попавшие в воды его акватории вселенцы и

их личинки (вместе с балластными водами судов, а также в составе обрастателей их корпусов) оказываются в сбросных водах, прошедших через систему охлаждения АЭС. Это способствует образованию благоприятной для существования тепловодных организмов среды. Подобное характерно и для акватории г. Майдзуру, где имеется развитая судостроительная, текстильная и строительная промышленность. Между крупным портом г. Хакодате (140.72° в. д., 41.76° с. ш.; 0.306 млн жителей, 1967) и г. Аомори действует постоянная морская паромная переправа, что также способствует распространению вселенцев.

Места нахождения вселенцев в окрестностях даже небольших прибрежных городов указывают на благоприятные для них условия среды. Ее формируют теплые сточные воды предприятий, различные отходы, плавучие платформы, якорные буи и т. д. В частности, исследования в ЗПВ [Звягинцев, Корн, 2003] показывают, что в теплое время года там на антропогенных субстратах присутствуют особи *A. amphitrite*.

Характерное распределение участков появления вселенцев (рис. 1) показывает, что новые участки обнаруживаются вблизи ранее заселенных вселенцами районов возле акватории города. При этом, чем он крупнее, тем больше таких участков. Сопоставление случаев на рис. 1 указывает на определенное совпадение дат одновременного нахождения особей разных видов.

Число находок особей сразу трех видов составляет 25% от общего числа наблюдений, что указывает на существование межвидовых отношений между ними.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения числа участков прибрежья, где в 1935–2000 гг. были найдены усоногие раки. Во второй половине XX в. отмечается быстрый рост числа таких участков, что связано с интенсификацией судоходства.

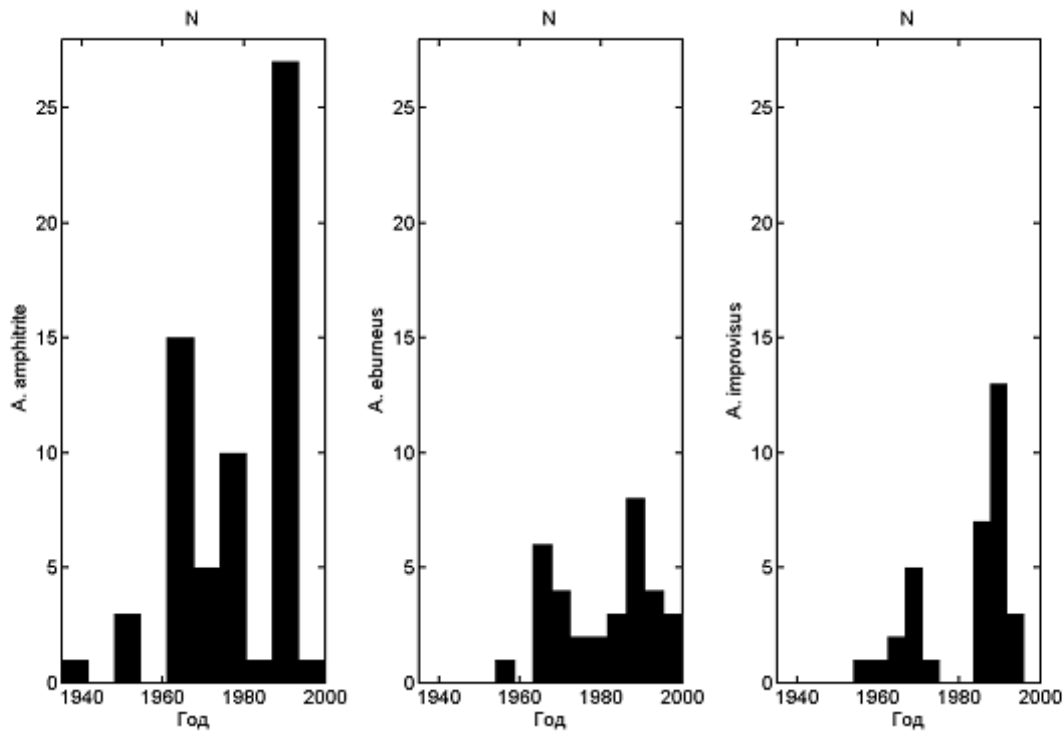


Рис. 2. Гистограммы распределений числа участков побережья Японии, где в 1935–2000 гг. были впервые встречены усоногие раки (ось абсцисс – годы наблюдений, ось ординат – суммарное число участков).

Проблемы построения моделей динамики организмов в морской биологии связаны, как правило, с ограниченным набором наблюдений, их фрагментарностью и нерегулярностью, трудоемкостью и дороговизной совместных измерений биомасс, параметров состояния среды, факторов антропогенного воздействия и т. д. Эти модели содержат большое число

трудноизмеримых параметров. Поэтому в основном такие модели представляют собой искусственные лабораторные системы.

Определенный класс моделей биоинвазии следует из уравнений, которые для одномерного случая принимают вид [Lewis, Pacala, 2000; Neubert et al., 2000]

$$B(x, t + \Delta t) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(x, y) f(B(y, t)) B(y, t) dy, \quad (1)$$

где $B(x, t)$ – биомасса особей в точке x в момент t ; Δt – временная дискретность; $k(x, y)$ – ядро интегрального уравнения (посредством его учитывается влияние на биомассу в точке x биомасс особей в точке y); $f(B(y, t))$ – плодовитость особи. Конкретизация моделей состоит в указании $k(x, y)$ и $f(B(y, t))$. Применимость этих

моделей ограничена, в основном, рассмотрением продвижения фронта биоинвазии.

Широкий класс моделей биоинвазии следует из уравнения, которое в одномерном случае имеет вид [Лобанов, Старожилова, Черняев, 1999; Weinberger, 2002]

$$\partial B / \partial t = f(B)B + \partial(D\partial B / \partial x) / \partial x, \quad (2)$$

где $f(B)$ – плодовитость особей; D – коэффициент диффузии (в общем случае

некоторая функция внешнего поля и B). Уравнение (2) характеризует систему

«реакция-диффузия», где учитывается расселение взрослых особей и личинок. Это выгодно отличает (2) от (1). В рамках данного класса за счет варьирования представлений $f(B)$ и D можно построить

$$f(B) \equiv a - bB, \quad (3)$$

где a – скорость естественного прироста, а b – смертность организмов из-за неблагоприятных факторов среды.

В перечисленных выше классах моделей отсутствуют составляющие, которые характеризуют морскую среду и воздействие ряда других внешних факторов (интенсивность судоходства, сток вод предприятий и т. д.). Включение таких параметров в модели существенным образом повышает их практическую значимость, способствует оперативному прогнозированию различных ситуаций (в том числе и техногенных катастроф).

Разработка данной модели биоинвазии была выполнена в рамках представлений (2) и (3), где учитывались результаты анализа используемого материала и были приняты следующие допущения:

- 1) динамика биомассы вселенцев определяется их приростом, смертностью, расселением и жизнедеятельностью населенных

$$\begin{aligned} \partial B_i / \partial t &= [a_i(T, S) - b_i(T, S)(B_1 + B_2 + B_3)]B_i + g_i(T, S)N + D_i \partial^2 B_i / \partial s^2, \\ dN / dt &= j(x, t) \end{aligned} \quad (4)$$

где $x \equiv (x_1, x_2)$ – точка системы координат на плоскости рис. 1 (единица измерения – градус); t – текущий момент времени (единица измерения – 1 год); $B_i \equiv B_i(x, t)$ – биомасса особей i -го вида ($i=1$ – *A. amphitrite*, $i=2$ – *B. eburneus*, $i=3$ – *A. improvisus*); $T \equiv T(x, t)$, $S \equiv S(x, t)$ – температура и соленость воды; $a_i(T, S)$ – прирост биомасс i -го вида, $b_i(T, S)$ – смертность особей вследствие их конкуренции; $g_i(T, S)$ – динамика биомасс, которая обусловлена морскими перевозками и результатами жизнедеятельности городов; $N \equiv N(x, t)$ – численность населения в точке x в t году;

большое число разнообразных моделей биоинвазии. Так, широкое распространение имеет линейная зависимость $f(B)$ от B

- пунктов (в том числе, морскими грузоперевозками);
- 2) состояние среды определяется ее температурой и соленостью;
- 3) естественный прирост и смертность зависят от состояния среды обитания, конкуренции особей за субстрат;
- 4) полагается линейная зависимость между численностью населения в данном месте и динамикой биомассы усонагих раков;
- 5) поскольку средой обитания видов является узкая прибрежная полоса, то расселение усонагих раков имеет характер одномерной диффузии (пространственное положение особей определяется длиной дуги s вдоль контура отдельного острова).

Согласно указанным фактам естественной представляется такая модификация (2)

$D_i \equiv D_i(x, t)$ – коэффициенты диффузии; s – длина дуги береговой линии; $j(x, t)$ – динамика численности населения в точке x в момент времени t .

Первый член правой части первого уравнения (4) есть модификация модели логистического роста [Свирижев, Логофет, 1978]; второй член – динамика биомассы, которая обусловлена морскими перевозками и жизнедеятельностью населенных пунктов; третий – естественное расселение. В модели (4) полагается, что эти процессы пропорциональны численности населения портового города.

Параметризация $\{a_i(T, S), i = 1 \div 3\}$

состоит в следующем. Каждый из видов приспособлен к определенному диапазону T и диапазону S среды. Учет такой ситуации выполнен с помощью введения оптимальных для существования особей вида параметров T_i^* и S_i^* . Поскольку отклонения температуры

$$a_i(T, S) = a_{i,1} - a_{i,T}(T - T_i^*)^2 - a_{i,S}(S - S_i^*)^2, \quad (5)$$

где $a_{i,1}, a_{i,T}, a_{i,S}, T_i^*, S_i^*$ – подлежащие определению неотрицательные коэффициенты. Их физический смысл состоит в следующем: $a_{i,1}$ характеризует оптимальный естественный прирост биомассы i -го вида, который наблюдается при совпадении температуры и солености среды с их оптимальными для вида значениями; $a_{i,T}, a_{i,S}$ – динамику прироста, которая обусловлена соответственно отклонением T

$$b_i(T, S) = b_{i,1} + b_{i,T}(T - T_i^*)^2 + b_{i,S}(S - S_i^*)^2, \quad (6)$$

где $b_{i,1}, b_{i,T}, b_{i,S}$ – подлежащие определению неотрицательные коэффициенты (их неотрицательность показывает внутри- и межвидовую конкуренцию). Согласно соотношению (6), отклонение температуры и солености от их оптимальных значений приводит к росту смертности особей. Их физический смысл состоит в следующем: если температура и соленость среды совпадает с оптимальными для i -го вида значениями, то естественную смертность

$$g_i(T, S) = g_{i,1} - g_{i,T}(T - T_i^*)^2 - g_{i,S}(S - S_i^*)^2, \quad (7)$$

где $g_{i,1}, g_{i,T}, g_{i,S}$ – подлежащие определению коэффициенты. Их физический смысл состоит в следующем: $g_{i,1}$ характеризует выживаемость доставленных судами особей i -го вида при совпадении температуры и солености среды с их оптимальными для этого вида значениями; $g_{i,T}, g_{i,S}$ – снижение

$T - T_i^*$ и солености $S - S_i^*$ от их оптимальных значений негативно сказываются на динамике видов, то $a_i(T, S)$ является убывающей функцией четных степеней этих отклонений. Простую аппроксимацию $a_i(T, S)$ можно записать в виде

и отклонением S от оптимальных для них значений.

Поскольку при отклонении температуры и солености от оптимальных для баянусов значений смертность увеличивается, то $b_i(T, S)$ является возрастающей функцией. Подобным (4) образом принимается следующая аппроксимация $b_i(T, S)$

характеризует $b_{i,1}$; $b_{i,T}, b_{i,S}$ характеризуют динамику смертности, которая обусловлена отклонениями T и S от соответствующих значений.

Для параметризации $g_i(T, S)$ ранее [Четырбоцкий, 2008] применялись соотношения, в которые входят расстояния между портами. Нами используются те же допущения, что и при аппроксимации (5) и (6):

выживаемости, которое обусловлено отклонениями T и S от соответствующих значений.

Учет перечисленных фактов и допущений приводит к следующей модели инвазии усоногих раков

$$\begin{aligned} \partial B_i / \partial t &= [a_i(T, S) - b_i(T, S)(B_1 + B_2 + B_3)]B_i + g_i(T, S)N + D_i \partial^2 B_i / \partial s^2 \\ dN / dt &= j(x, t) \\ a_i(T, S) &= a_{i,1} - a_{i,T}(T - T_i^*)^2 - a_{i,S}(S - S_i^*)^2, \\ b_i(T, S) &= b_{i,1} + b_{i,T}(T - T_i^*)^2 + b_{i,S}(S - S_i^*)^2 \\ g_i(T, S) &= g_{i,1} - g_{i,T}(T - T_i^*)^2 - g_{i,S}(S - S_i^*)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

где $i=1 \div 3$.

Для (8) естественно задать нулевые начальные условия

$$B_i(x, t_0) = 0, \quad (9)$$

и нулевые потоки на границах контура Γ

$$\partial B_i / \partial s |_{\Gamma} = 0.$$

Оценка параметров модели и прогноз состояния биоинвазии

При построении модели мы руководствовались общими принципами, изложенными далее. Разделение общей задачи построения модели на отдельные этапы весьма условное. Их последовательность выявляется при организации и выполнении вычислительных экспериментов, которые обычно носят итерационный характер. При их проведении исходные факты дополняются неучтенными или новыми подробностями, что приводит к уточнению основных положений модели. Соответствующим образом модифицируется вычислительный алгоритм, отрабатывается организация выполнения решения поставленной задачи, способ и форма представления результатов расчетов. Процесс моделирования и выборка результатов экспериментов дополняют друг друга. Эксперименты зачастую необходимо интерпретировать посредством моделирования, а моделирование следует проверять экспериментами [Оран, Борис, 1990]. Вычисление оценок значений параметров и проверка адекватности модели ее реальному прототипу выполняется посредством поиска экстремумов целевой функции (невязки). Она

является мерой неадекватности наблюдаемых и рассчитанных по модели значений зависимых переменных задачи. При этом тип целевой функции непосредственно определяет метод оценки параметров.

При оценке параметров модели учитывались рекомендации, представленные в работе Н.Н. Моисеева, Ю.П. Иванилова, Е.М. Столяровой [1978].

Численные процедуры решения задач нелинейной оценки параметров представляют собой реализации алгоритмов поиска экстремума (экстремумов) функционала, выбор формы которого существенным образом зависит от условий проведения наблюдений и имеющейся априорной информации о распределениях параметров модели. Задача оценки параметров состоит в следующем [Бард, 1979]. Пусть p есть вектор искомым параметров модели, а $\Phi(p)$ – мера отклонений наблюдаемых величин от их модельных образов или так называемая невязка. Тогда задача состоит в поиске вектора p , который минимизирует $\Phi(p)$:

$$\min \Phi(p) \text{ для } p \in P, \quad (10)$$

где P – область допустимых значений параметров. Без ограничения общности можно полагать, что она соответствует

$$\Phi(p) = \sum_{i=1}^3 \sum_{Y=1935}^{2000} \sum_{m=1}^7 \sum_{k \in I(i,Y,m)} (B_{i,Y,m,k}^{(D)} - B_{i,m,k}(Y,p))^2, \quad (11)$$

где $\{B_{i,Y,m,k}^{(D)}\}$ – выборка данных распределений мест нахождения рассматриваемых видов (см. рис. 1). Здесь i – вид, $i=1 \div 3$; Y – год наблюдения, $Y=1935 \div 2000$; m соответствует принятой нумерации островов Японии (1 – о. Кюсю, 2 – о. Сикоку, 3 – о. Авадзи, 4 – о. Хонсю, 5 –

n – мерному гиперкубу. В случае решения (10) методом наименьших квадратов $\Phi(p)$ принимает вид:

о. Садо, 6 – о. Хоккайдо, 7 – о. Кунашир), $m=1 \div 7$; k – элемент набора $\{I(i,Y,m) : i=1 \div 3, Y=1935 \div 2000, m=1 \div 7\}$ номеров точек контура m -го острова, где в Y -м году были обнаружены особи i -го вида. Исходный материал насчитывает 141 наблюдение, набор параметров модели (8)–(10)

$$p \equiv \{(a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, T_i^*, S_i^*, b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}, D_i), i=1 \div 3\}$$

содержит 36 элементов. Временной шаг модели составляет 1 год.

Параметрическая идентификация модели определяется объемом выборки исходных наблюдений и уровнем ее статистической достоверности. В этой статье выборкой является сформированный Отани [Отани, 2002] массив пространственно-временного распределения особей усконогих раков (*A. amphitrite*, *A. eburneus* и *A. improvisus*) в прибрежных водах Японии. Наблюдения выборки отражают результаты видового районирования [Кафанов, Кудряшов, 2000]. Количественные оценки биомасс определялись результатами большого числа натурных исследований. Согласно им: *A. amphitrite* – 5.2 кг/м², *A. eburneus* – 1.4 кг/м², *A. improvisus* – 1.4 кг/м² [Зевина, Стрелков, 1983; Звягинцев, Корн, 2003; Звягинцев, 2005].

Данные о численности населения городов были нами получены в сети Интернет (<http://world-gazetteer.com/>, http://ru.wikipedia.org/wiki/Крупнейшие_города_мира, <http://news.leit.ru/archives/3954>, <http://search.japantimes.co.jp/cgi-bin/nn20081228a3.html>). Численные расчеты были выполнены в среде программирования MATLAB [Рудаков, Сафонов, 2000]. Для решения задачи (8)–(10) использовались разработанные в этой среде модули геоинформационной системы «Ледяной

покров Японского моря» [Четырбоцкий, 2005]. В частности, использовались программные модули, которые реализуют редукцию многомерной задачи поиска экстремума к последовательности одномерных задач [Стронгин, 1978; Четырбоцкий, 1991], модули оценки ковариационной матрицы параметров и адекватности моделей [Четырбоцкий, 2005].

Границы области P допустимых значений параметров обычно задаются на основе априорной информации. В настоящем случае их диапазоны определялись в интерактивном режиме согласно поиску решения задачи (8)–(10). Критерием качества подгонки параметров служило значение коэффициента корреляции между выборочным и соответствующим ему модельным распределениями. Его большое значение 0.739 показывает высокую степень их соответствия.

Оценки параметров приведены в таблице.

При вычислении параметров определялись доверительные интервалы параметров, которые характеризуют надежность их оценок [Бард, 1979]. Все они больше нуля, т. е. статистически значимы [Кендалл, 1973].

Таблица Численные оценки параметров модели с указанием доверительных интервалов*

	$i=1$	$i=2$	$i=3$		$i=1$	$i=2$	$i=3$
$a_{i,l} \cdot 10^2$	9.16±2.01	9.04±1.99	9.06±1.24	$g_{i,l} \cdot 10^2$	4.95 ±2.78	4.99±2.74	0.93±0.16
$a_{i,T} \cdot 10^4$	1.04±0.32	1.13±0.29	1.05±0.31	$g_{i,T} \cdot 10^5$	5.48 ±0.71	5.51±0.80	1.04±0.23
$a_{i,S} \cdot 10^4$	2.57±0.93	2.48±1.10	0.14±0.02	$g_{i,S} \cdot 10^5$	1.09±0.34	1.32±0.31	1.22±0.11
$b_{i,l} \cdot 10^2$	5.49±1.27	5.01±0.98	5.33±0.82	$D_i \cdot 10^3$	5.11±2.06	5.02±1.68	3.54±0.62
$b_{i,T} \cdot 10^4$	5.51±0.83	5.04±0.77	1.26±0.38	T_i^*	17.5±4.9	17.4±5.1	25.1±1.6
$b_{i,S} \cdot 10^4$	2.63 ±1.34	2.55±1.12	1.07±0.13	S_i^*	30±5.3	28±9.3	32.5±6.4

*Примечание. Представлены 95% доверительные интервалы.

На основании оценок параметров были выполнены расчеты прогноза динамики биомассы в 1926– 2001 гг. на акватории городов Японии (рис. 3.).

Анализ распределений показывает, что у особей *A. eburneus*, вследствие их большей, чем у особей остальных видов, зависимости от разности между наблюдаемой температурой и ее оптимальным значением, отмечаются меньшие биомассы (акватории (а–д). На акватории (а) – средняя температура $\bar{T}_a = 20.62^\circ\text{C}$ и соленость $\bar{S}_a = 33.67\%$. Эти условия оказываются благоприятными как для *A. amphitrite*, так и для *A. improvisus*. $\bar{T}_b = 17.14^\circ\text{C}$ и $\bar{S}_b = 33.51\%$ оказываются более благоприятными для *A. improvisus*, чем для *A. amphitrite*. Похожая ситуация и на акватории (в) ($\bar{T}_c = 19.11^\circ\text{C}$ и $\bar{S}_c = 33.12\%$). Поскольку вследствие стоков промышленных предприятий акватории вблизи больших городов менее солены, и, стало быть, более благоприятны для *A. amphitrite*, то там он доминирует. Подобное наблюдается и в акваториях (г–е): $\bar{T}_d = 18.99^\circ\text{C}$, $\bar{S}_d = 32.54\%$; $\bar{T}_e = 17.71^\circ\text{C}$, $\bar{S}_e = 33.37\%$; $\bar{T}_f = 13.35^\circ\text{C}$, $\bar{S}_f = 32.82\%$. Первое появление особей этих видов в акватории г. Владивостока в 1981 г. [Кафанов, Жуков, 1993] вполне согласуется с нашей моделью.

Заключение

Полученные результаты основываются на математической модели инвазии усонюгих

раков. Для параметризации процессов переноса судами организмов из одних портов в другие предлагается использование показателя численности жителей прибрежных городов. Для юга Приморского края актуальность рассмотрения инвазии обусловлена планируемым строительством объектов АТЭС, нового университета и океанариума на о. Русском в г. Владивосток. Это вызовет значительный рост населения ЗПВ и морских грузопассажирских перевозок. В ходе ожидаемого экономического развития Приморского края последует резкое увеличение антропогенного пресса на прибрежные экосистемы ЗПВ. Так, к началу работы нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан более 800 супертанкеров дедевитом 150–300 тыс. тонн в год будут транспортировать нефть из России, способствуя интродукции огромного числа видов-вселенцев, в первую очередь – усонюгих раков. Личинки практически всех донных видов организмов, исчисляемые многими миллиардами особей, будут перевозиться из разных районов Мирового океана и попадать в ЗПВ с балластными водами супертанкеров. В то же время половозрелые особи в составе обрастания этих судов могут оказаться способными к размножению. Акклиматизация обрастателей может привести к драматическим результатам для бентосных и планктонных сообществ. Отметим, что

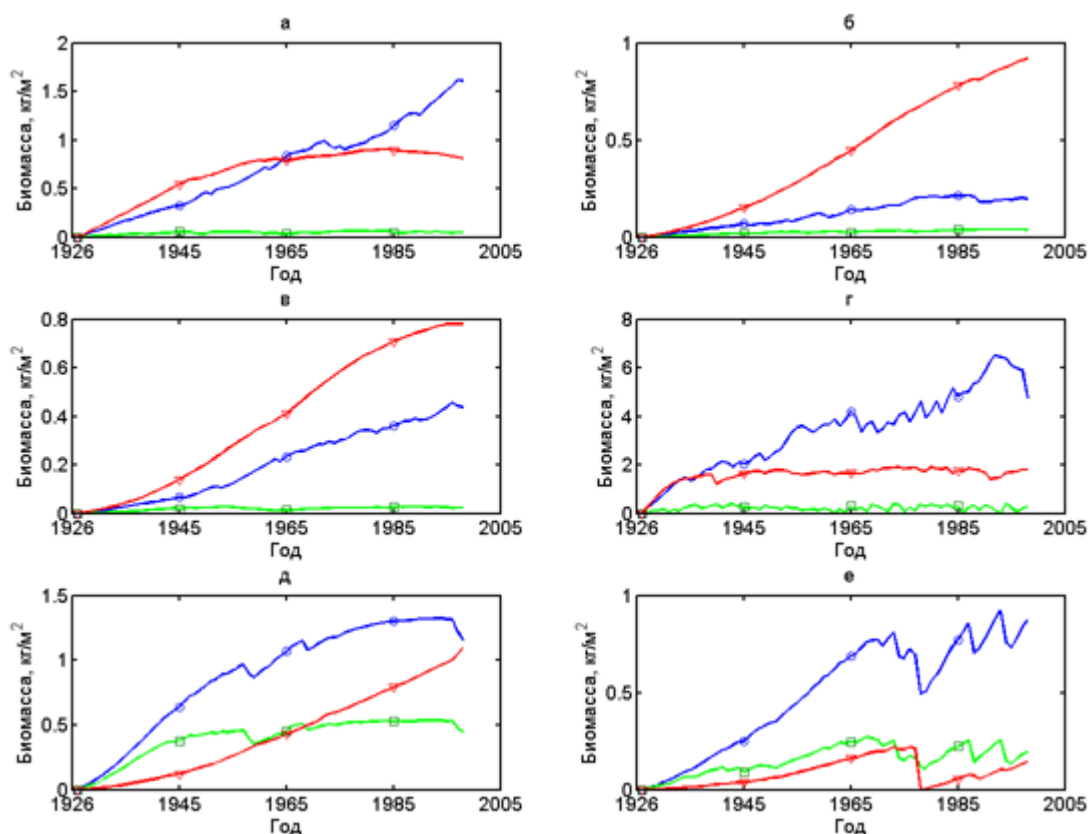


Рис. 3. Модельная динамика биомасс усонюгих раков в акватории городов Японии (зелеными квадратиками отмечены распределения *A. amphitrite*, красными треугольниками – *A. eberneus*, синими кружками – *A. improvisus*): а) Китакюсю (130.41° в. д., 33.58° с. ш.), б) Аомори (140.75° в. д., 40.82° с. ш.), в) Цуруга (135.06° в. д., 35.65° с. ш.), г) Токио (139.87° в. д., 35.69° с. ш.), д) Хиросима (132.47° в. д., 34.40° с. ш.), е) Майдзүру (135.18° в. д., 35.33° с. ш.).

«термальное загрязнение», вызванное сбросом нагретых вод новых промышленных предприятий, может сопровождаться различными экологическими последствиями для популяций бентоса и обрастания, в частности, способствовать акклиматизации теплолюбивых видов усонюгих раков.

Разработанная нами модель биоинвазии усонюгих раков на шельфе Японского моря на примере трех видов усонюгих раков представляет собой важный этап исследования биоинвазий в дальневосточных морях России. В модели учитываются динамика биомассы животных, их конкуренция за исходный субстрат, оптимальный для существования вида диапазон влияния температуры и солености воды, характер расселения организмов вдоль берега моря, перенос их на корпусах судов и с балластными водами.

В дальнейшем предполагается построение геоинформационной системы прибрежного распределения интродуцентов и моделей их сообществ, детализация их параметрической идентификации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП «Мировой океан» на 2008–2012 гг. госконтракт № 01.420.1.2.0003 от 7 ноября 2008 г.; грантов РФФИ–ДВО 09-04-98580-р «Морские биоинвазии и роль судовых балластных вод в расселении видов 2009–2010 гг.», Президиума РАН 2008 г. «Реакция морской биоты на изменение природной среды и климата», «Биологическая безопасность дальневосточных морей России», «Методология мониторинга морского биоразнообразия регионального проекта «Дальний Восток», целевой комплексной программы ДВО РАН «Биологическая

безопасность дальневосточных морей Российской Федерации» на 2008 г., гранта фонда APN ARCP2006-FP14-Adrianov, РФФИ 09-04-00087-а; целевой комплексной программы ДВО РАН «Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации» на 2010 г., гранта фонда APN ARCP2006-FP14-Adrianov.

Безвременно ушедший из жизни профессор А.И. Кафанов (ИБМ ДВО РАН) являлся инициатором настоящих исследований. Им также было сформулировано и обоснованно положение о диффузионном естественном расселении усонюгих раков.

Авторы выражают признательность сотруднику ИБМ ДВО РАН И.А. Кашину за внимательное отношение к нашей работе и ценные замечания и сотруднику ТОИ ДВО РАН Н.И. Рудых за предоставленные материалы по распределению температуры и солености прибрежных вод Японии.

Литература

- [1] Андреев В.Л. Классификационные построения в экологии и систематике. М.: Наука, 1980. 142 с.
- [2] Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. 349 с.
- [3] Звягинцев А.Ю. Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2005. 432 с.
- [4] Звягинцев А.Ю. Проблема морских биоинвазий в заливе Петра Великого с балластными водами и обрастанием судов // Чтения памяти академика А.В. Жирмунского. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 22–34.
- [5] Звягинцев А.Ю., Корн О.М. Усоногий рак *Balanus amphitrite Darwin* в заливе Петра Великого Японского моря // Биология моря. 2003. Т. 29. № 1. С. 50–58.
- [6] Зевина Г.Б. Усоногие раки подотряда *Lepadomorpha* Мирового океана. Часть II. Л.: Наука, 1982. 223 с.
- [7] Зевина Г.Б., Горин А.Н. Флюктуация усонюгих раков в обрастаниях буев залива Петра Великого // Обрастания в Японском и Охотском морях. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975. С. 71–78.
- [8] Зевина Г.Б., Стрелков В.И. Морфологические изменения табличек *Balanus improvisus* в разных районах ареала // Биологические ресурсы Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 136–146.
- [9] Кафанов А.И., Жуков В.Е. Прибрежное сообщество водорослей макрофитов залива Посыета. Владивосток: Дальнаука, 1993. 154 с.
- [10] Кафанов А.И., Кудряшов В.А. Морская биогеография. М.: Наука, 2000. 176 с.
- [11] Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 899 с.
- [12] Лобанов А.И., Старожилова Т.К., Черняев А.П. Резонансные явления в системах типа «реакция-диффузия» // Математическое моделирование. 1999. Т. 11. № 7. С. 75–82.
- [13] Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М.: Наука, 1978. 128 с.
- [14] Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
- [15] Полтаруха О.П., Корн О.М., Пономаренко Е.А. Свободноживущие усонюгие ракообразные и фасетотекты // Биота российских вод Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2006. Т. 5. 154 с.
- [16] Протасов А.А. Биологическое разнообразие водных экосистем в аспекте проблемы интродукции чужеродных организмов /Под ред. Р. Баштанного, В. Работнева. Одесса, Украина, 26–27 августа 2003 г. Одесса. 2003. Вып. 8. С. 70–81.
- [17] Радашевский В.И., Ивин В.В., Звягинцев А.Ю. Создание базы данных по видам-вселенцам Северной Пацифики // Современные проблемы морской инженерной экологии: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Ростов-н/Д: ЮНЦ РАН, 2008. С. 210–211.
- [18] Рудаков П.И., Сафонов В.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.X. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 416 с.

- [19] Рудых Н.И. Закономерности изменчивости солености воды в Японском море. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток, 2008. 24 с.
- [20] Свирежев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
- [21] Стронгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах (информационно-статистические алгоритмы). М.: Наука, 1978. 239 с.
- [22] Турпаева Е.П., Ямпольский А.Д. О возможности обнаружения подъема вод по океаническому обрастанию // Океанология. 1979. Т. 19. Вып. 6. С. 1116–1124.
- [23] Четырбоцкий А.Н. Методы и алгоритмы решения задач снижения размерности пространства описания. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. 95 с.
- [24] Четырбоцкий А.Н. Параметрическая идентификация модели биоинвазии морских организмов верхних отделов шельфа // Современные информационные технологии для научных исследований. Всерос. конф., Магадан, 20–24 апреля 2008 г. С. 160–162.
- [25] Четырбоцкий А.Н. Технология построения геоинформационных систем для ледяного покрова замерзающих морей (на примере ГИС «Ледяной покров Японского моря») // Информ. технол. 2005. № 11. С. 17–23.
- [26] Calcagno J.A., López Gappa J., Tablado A. Growth and production of the barnacles *Balanus amphitrite* in an intertidal area affected by sewage population // J. Crust. Biol. 1997. V. 17, № 3. P. 417–423.
- [27] Davidoff C.N. Contribution a l'étude des invertébrés de la faune marine benthique de l'Indochine // Bull. Biol France – Belgique. 1952. Suppl. 37. P. 128–129.
- [28] Lewis M.A., Pacala S. Modeling and analysis of stochastic invasion processes // J. Math. Biol. 2000. № 41. P. 387–429.
- [29] Neubert M. G., Kot M., Lewis M.A. Invasion speeds in fluctuating environments // Proc. R. Soc. 2000. № 267. P. 1603–1610.
- [30] Otani M. Appearance and latest trends of introduced marine sessile animals in Japanese waters // Sessile Organisms. 2002. V. 19. № 2. P. 69–92.
- [31] Weinberger H.F. On spreading speeds and traveling waves for growth and migration models in a periodic habitat // J. Math. Biol. 2002. № 45. P. 511–548.

MATHEMATIC MODELING AND EVALUATION OF BIOINVASION STATE OF BARNACLES ON THE SHELF OF JAPAN

© 2010 Chetyrbotskiy A.N.¹, Zvyagintsev A.Yu.², Kafanov A.I.²

¹ Far-Eastern Geological Institute of the Far-Eastern Branch of the RAS
690022 Vladivostok, prosp. 100 let Vladivostoku, 159
chetyrbotsky@yandex.ru

² Institute of Sea Biology of the Far-Eastern Branch of the RAS
690041 Vladivostok, ul. Palchevskogo, 17
ayzvyagin@gmail.com

The results of statistical analysis of spatio-temporal distributions of the barnacles *Amphibalanus improvisus*, *A. amphitrite*, *A. eburneus* in 1935–2000 on the shelf of Japan are given. It is shown that the places of their initial findings were timed to areas of water of big sea ports and the places of localization of energy complexes. On the basis of the results of statistical analysis of samplings the empirical patterns of barnacles' bioinvasions in the Sea of Japan area of water were revealed. A mathematical model of their bioinvasion was developed and examined. This model takes into account these patterns and suggested parametrical presentations of natural increase, intra- and interspecies competition, sea environment condition, navigation intensity and results of population vital activity, natural settling of individuals. The algorithms of numer dynamics and evaluation of the model adequacy are suggested. A good concordance between model and sampling didtributions has been established.

Key words: invasion, model, parametrical indentification, barnacles.